

## LiBr용액량 변화에 따른 수평다관 흡수기의 특성 연구

An investigation of absorption phenomena in the horizontal staggered tube absorber for various LiBr solution flow rates

권 율, 윤 상 국\*\*

Y. Kwon, S. K. Yun

**Key words:** Absorber(흡수기), Absorption phenomena(흡수현상), Heat and mass transfer (열 및 물질전달), Staggered tube(엇갈림형관), Optimum solution flow rate(최적 흡수용액 유량)

### ABSTRACT

An experimental study of absorption phenomena of water vapor into LiBr solution was carried out to find out the optimum solution flow rate. The staggered bundle of horizontal absorption tubes, which are the same configuration as the commercial heat pump, were tested. The results showed that the heat transfer and absorption rate were enhanced with the increase of LiBr solution flow rate. Those values for different absorber pressures showed the same qualitative trends. The optimum flow rate of solution was obtained as three times of the designed flow rate.

### 기 호 설 명

$A$  : 전열면적 [ $m^2$ ]  
 $C_p$  : 정압비열 [ $kJ/kg \cdot K$ ]  
 $d$  : 흡수관 직경 [ $m$ ]  
 $g$  : 중력가속도 [ $m/s^2$ ]  
 $h$  : 열전달계수 [ $W/m^2 \cdot K$ ]  
 $K$  : 열전도도 [ $W/m \cdot K$ ]  
 $L$  : 흡수관 길이 [ $m$ ]  
 $\dot{m}$  : 질량유량 [ $kg/s$ ]  
 $N$  : 갯 수  
 $Nu$  : Nusselt 수  
 $P$  : 압력 [ $mmHg$ ]  
 $Q$  : 단위시간당 총전열량 [ $kW$ ]  
 $Sc$  : Schmidt 수  
 $Sh$  : Sherwood 수

$T$  : 온도( $^{\circ}C$ )  
 $\Delta T$  : 온도차( $^{\circ}C$ )  
 $U$  : 총괄 열전달계수 [ $W/m^2 \cdot K$ ]

### 그리스 문자

$\beta$  : LiBr수용액의 물질전달계수 [ $m/s$ ]  
 $\rho$  : 밀도 [ $kg/m^3$ ]  
 $\delta$  : 액막두께 [ $m$ ]  
 $\xi$  : LiBr수용액농도 [wt%]  
 $\Gamma$  : 액막유량 [ $kg/sm$ ]

### 하첨자

$a$  : 흡수기  
 $cu$  : 냉각수  
 $i$  : 내경  
 $in$  : 입구  
 $lm$  : 대수평균

\* 정회원, 한국해양대학교 대학원 기계공학과

\*\* 정회원, 한국해양대학교 냉동공조공학과

o : 외경  
 out : 출구  
 p : 압력  
 s : 시스템  
 sol : LiBr수용액  
 v : 냉매증기

## 1. 서론

상용화된 흡수식 열펌프는 작동매체에 따라 LiBr/H<sub>2</sub>O식과 H<sub>2</sub>O/NH<sub>3</sub>식 2종류가 있다. 이중 LiBr/H<sub>2</sub>O계를 사용하는 흡수식 열펌프는 흡수제인 LiBr가 화학적으로 안정하고, 냉매인 물은 증발 잠열이 큰 특성이 있어 시스템의 효율과 취급 등 기능적인 면에서 우수하여 대형 빌딩의 공조용이나 지역냉난방의 주요 냉방시스템으로 널리 사용되고 있다. 최근에는 가정용 압축식 냉방기의 대체를 위하여 LiBr/H<sub>2</sub>O흡수식 열펌프의 소형화에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 흡수식 열펌프는 에너지의 효율적 사용 면에서 앞으로 그 수요는 더욱 증가할 것으로 예상되며, 시스템에 관한 기본기술이나 성능개선에 관한 연구가 지속적으로 이루어질 것으로 판단된다.

LiBr/H<sub>2</sub>O 계 흡수식 열펌프의 주요 구성품중의 하나인 흡수기는 시스템의 소형화, 경량화 및 고효율화를 위하여 중요한 요소가 되고 있다. 이에 관한 연구들을 보면, Hoffmann<sup>(1)</sup>, Cosenza<sup>(2)</sup> 등은 2종의 정방향 다층 수평관의 흡수특성을 실험하였고, Kim<sup>(3)</sup> 등은 흡수 관외벽의 용액 흐름이 증가될 때의 흡수 물질전달계수의 변화를 연구하였다. 또한 김선창<sup>(4)</sup> 등은 공냉형 흡수기의 흡수특성에 대하여 연구하였고, 윤정인<sup>(5)</sup> 등은 각종 흡수관형태에 따른 열 및 물질전달 특성을 검토한 바 있다. 설신수<sup>(6)</sup> 등은 수평관에서 분사 유량에 따른 흡수기 내의 유동 형태와 흡수와 비흡수 시의 전열특성을 변화 관찰하였다.

그러나 이들은 주로 단일 수직관이나 정방향(inline type) 단일수평관에 관한 연구에 국한되어 있으며, 대형 흡수식 열펌프에 채택되는 장방향(staggered type) 다층 수평직관 흡수기에 대한 연구는 전무한 실정이다. 이에 본 연구에서는 현재 상업용 흡수식 냉난방기와 동일한 장방향 다층 수평직관에서 LiBr 용액의 유하량이 변할 경우 냉매증기의 흡수특성 즉 열 및 물질전달의

특성을 파악하고 최적의 흡수용액 유량을 도출하기 위하여 실험적 연구를 수행하였다.

## 2. 실험장치 및 실험 방법

### 2.1 실험 장치

증발기에서 발생한 냉매증기가 흡수기에서 LiBr농용액에 흡수될 때 일어나는 열 및 물질전달 특성 실험을 위한 장치의 개략도는 Fig. 1에 나타내었다. 성능시험장치는 하나의 셀안에 흡수기와 증발기, 냉각수 순환용 항온조, 용액 온도 및 농도 조절용 수조, 그리고 용액 펌프로 구성되어 있다. 흡수기 및 증발기의 외통은 내부의 용액의 흐름 상태를 관찰하기 위하여 직경 300 mm의 아크릴 원통을 사용하였고 셀의 상단에는 용액을 흡수관 외부에 균일하게 산포 되도록 용액 분배기를 설치하였다. 실험에 사용된 흡수 용액관은 Fig. 2에서 보여주는 바와 같이 외경 15.9 mm, 관두께 1 mm, 총 14개의 50 cm 직관이 장방향으로 연결되었다. 관의 총길이는 7 m이며 실험부 유효길이(실제 실험부 길이)는 6.79 m의 동관으로 제작하였다. 단수는 9단으로 상·하 관사이의 피치는 19.5 mm, 좌·우 관사이의 피치는 34 mm로 상업용 흡수식 열펌프와 동일한 구조로 되어있다.

냉매증기는 증발기에 가설된 2 kW급 전열기에 의해 증기화되어 흡수기에 주입되며 발생 증기량은 슬라이더스로 조절된다. 흡수기에서는 LiBr농용액이 흡수직관의 표면을 따라 흡수기 하부로 유하하면서 측면의 증발기에서 발생되어 유입되는 냉매증기를 흡수하게 된다. 농도가 묽어진 LiBr수용액은 흡수기의 하부로 유출되어 용액 저장 수조로 순환된다. 이 용액의 농도는 흡수기 하부에서 채취되어 굴절률계로 측정된다. 흡수관 내부를 흐르는 냉각수는 항온조에 의해서 온도와 유량이 조절된 후 유량계를 지나 Fig. 2에서와 같이 흡수 열교환기의 하부로 유입되어 흡수열을 제거한 후 다시 항온조로 순환된다. 시험부의 흡수용액 온도 측정을 위하여 모두 10개의 열전대를 각 흡수관 하부에 1 mm 이격하여 설치하였다.

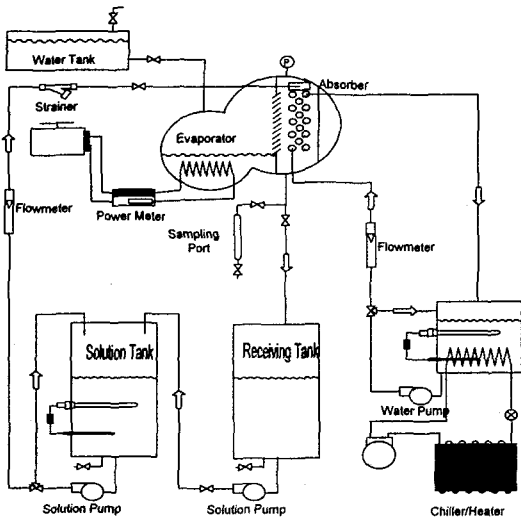


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

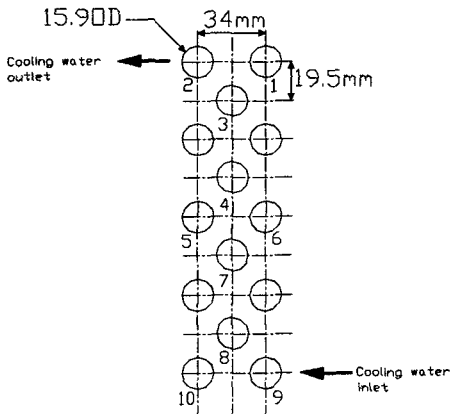


Fig. 2 Schematic diagram of staggered absorber tubes.

2.2 실험 방법

실험방법은 먼저 진공펌프를 이용하여 전체 시스템을 실험압력이 되도록 추기한다. 용액 수조에서 LiBr흡수용액의 농도와 온도를 실험 조건으로 맞추어 제조한 후, 흡수관 외부에 흡수액의 젖음성을 좋게 하기 위하여 먼저 건조한 흡수관 벽을 용액으로 충분히 적신다. 슬라이닥스를 조절하여 냉매를 발생시킨 후 발생하는 냉매로 인

해 상승된 흡수기내의 압력을 충분한 흡수유량을 흡수관에 산포하여 실험조건인 압력으로 저하시켜 유지한 후, 냉매 발생량을 조절하여 피라니게이지의 압력이 변하지 않는 정상 상태에서 흡수실험을 수행한다. 실험하려는 조건에 맞는 유량을 산포하면서 실험 장치가 정상상태에 도달한 후 실험 값을 수집하며, 실험은 비연속적(Batch type)으로 수행되었다. 흡수기 입·출구에서의 용액의 농도는 샘플링 실러더를 이용하여 용액을 추출, 굴절률계로 분석하고, 용액의 유량 측정엔 체적 유량계를 이용하였다. 흡수기 입·출구, 각 흡수관의 온도, 냉각수 온도 등의 온도는 ±0.15℃의 정밀도로 보정된 T-형 열전대로 측정되어 48채널의 HP3852A 데이터 처리기에 의해 기록되었다.

3. 열 및 물질전달 해석

3.1 열전달 해석

흡수기내의 전체 열전달율은 냉각수 온도와 유량의 실험데이터에 의해 다음과 같이 계산된다.

$$Q_a = \dot{m}_{cw} \cdot C_p \cdot (T_{cw,out} - T_{cw,in}) = U_o A_o \Delta T_{lm} \tag{1}$$

여기서 대수평균온도차는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{sol,in} - T_{cw,out}) - (T_{sol,out} - T_{cw,in})}{\ln \frac{(T_{sol,in} - T_{cw,out})}{(T_{sol,out} - T_{cw,in})}} \tag{2}$$

수평관외측의 대류열전달계수와 누셀수(Nusslet No.)는 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$h_o = \left[ \frac{1}{U_o} - \frac{A_o}{A_i} \frac{1}{h_i} - \frac{A_o \ln(d_o/d_i)}{2\pi KL} \right]^{-1} \tag{3}$$

$$Nu = \frac{h_o \delta}{k} \tag{4}$$

여기서 k는 용액의 열전도도이고, δ는 액막두께이다.

### 3.2 물질전달 해석

흡수기의 물질전달계수는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\beta = \frac{\dot{m}_v}{\rho \cdot \Delta \xi_{lm} \cdot A_o} \quad (5)$$

여기서  $\dot{m}_v$ 은 냉매증기의 농도차로 아래와 같다.

$$\Delta \xi_{lm} = \frac{(\xi_{in}^* - \xi_{in}) - (\xi_{out}^* - \xi_{out})}{\ln \frac{(\xi_{in}^* - \xi_{in})}{(\xi_{out}^* - \xi_{out})}} \quad (6)$$

여기서  $\xi^*$ 는 흡수기 입·출구에서 유하액막 온도와 기내압력으로부터 구한 기/액경계면의 흡수용액 평형농도이다.  $\xi$ 는 흡수기 입·출구에서 측정된 농도이다.  $A_o$ 는 증기의 접촉면적이고  $\rho$ 는 평균 용액밀도로 아래와 같이 구한다.

$$\rho = (\rho_{a,in} + \rho_{a,out})/2 \quad (7)$$

셔우드수는 다음과 같이 정의된다.

$$Sh = \frac{\beta D}{D} \quad (8)$$

여기서  $D$ 는 물질확산계수<sup>(7)</sup>이다.

## 4. 실험결과 및 고찰

수직관 흡수기에서의 열 및 물질전달에 관한 연구는 흡수용액 온도, 유량 및 농도와 냉각수의 온도, 유량, 압력의 변화 등 다양한 인자들의 영향에 대하여 수행되어 왔다. 본 수평 다관 흡수기의 실험에 있어서는 Table 1과 같이 흡수용액의 온도와 농도 그리고 냉각수 유량을 일정하게 유지하면서 흡수기내부의 압력과 흡수용액 유량의 변화에 따른 냉매의 흡수특성 대하여 실험적으로 연구하였다.

### 4.1 흡수기 각단의 온도와 열전달특성

Table 1 Range of experimental condition

Variable		Design value	Experimental range
LiBr solution	Temperature(°C)	47.5	47.5
	Flow rate(l/min)	0.75	1.0~4.0
	Film flow rate (kg/m·s)×10 <sup>3</sup>	6.68	8.91~35.6
	Concentration (wt %)	58	58
Cooling water	Flow rate(l/min)	7	7
	Temperature(°C)	32	32
Absorber pressure(Torr)		10	8~12

Fig. 3은 흡수기내의 압력을 10 Torr로 유지하면서 각기 다른 흡수용액 유량에 대한 냉매 흡수와 정중 흡수기 각 단의 용액온도 분포를 나타내고 있다. 이때 냉각수 유량은 7 l/min으로 일정하게 유지하였다. 시험부의 흡수용액 온도 측정 결과를 보면 흡수기 상부단에서 하부단으로 갈수록 흡수용액의 온도가 감소하고 있는 데, 이는 낮은 온도인 냉각수가 대향류로 흡수기 하부로부터 주입되기 때문이다. 한편 용액유량이 증가할수록 각 단에서의 용액온도가 높아짐을 보여준다. 이것은 일정압력에서 흡수용액량이 증가함에 따라 냉매의 흡수량이 증가하게 되며, 이때 발생된 흡수열이 냉각수에 충분히 제거되지 못하기 때문으로 분석된다. 한편 흡수기 하부 출구의 온도가 증가하는 것은 단열흡수(adiabatic absorption)에 의한 것이다. 즉 유하 흡수용액이 흡수기 최하단의 냉각관에 접촉하지 못함으로써 흡수열의 제거가 이루어지지 않기 때문이다.

Fig. 4는 LiBr흡수과정의 열전달 특성으로 흡수유량의 증가 즉 레이놀드수의 증가에 대한 누셀수를 나타낸다. 일정압력에서 흡수유량이 증가하면 관의 젖음성을 좋게 하고, 하부로의 흐름을 교란시켜 흡수력을 향상시키며, 이에 따른 흡수열의 발생이 냉각수와 흡수용액의 온도차를 크게

하여 열전달이 증가하는 것이다.

본 실험결과를 각 압력에서 흡수유량에 대한 열전달계수 관계의 일반식으로 표현하기 위하여 흡수용액의 열전달에 영향을 크게 미치는 인자인 무차원 압력항 즉 대기압 760 Torr와 시스템의 압력비  $P_s/a$ 를 도입하여 다음의 식으로 나타내었으며, 적용범위는 층류흐름인  $5 < Re < 35$ 에 적용된다.

$$Nu = 0.203Re^{0.78}Pr^{0.25}P_{s/a}^{0.29} \quad (9)$$

#### 4.2 흡수용액의 유량변화에 따른 물질전달 특성

Fig. 5와 Fig. 6은 각 압력에서 흡수유량의 증가에 따른 냉매의 흡수량과 셔우드수를 나타낸다. 본 결과는 냉각수의 온도, 냉각수의 유량, 시스템의 압력 등이 일정할 때 발생된 냉매증기를 충분히 흡수하는 최적의 관외 액막유량을 보여준다. 그림에서 흡수유량이 증가하면 흡수관 외부의 액막두께가 증가하여 냉매의 흡수량도 증가하게 된다. 그러나 액막 유량이 Table 1의 설계치  $0.00668 \text{ kg/s} \cdot \text{m}$  보다 4~5배이상 큰  $0.03 \text{ kg/s} \cdot \text{m}$  이상에서는 냉매 흡수량의 증가가 둔화되는 것을 볼 수 있다.

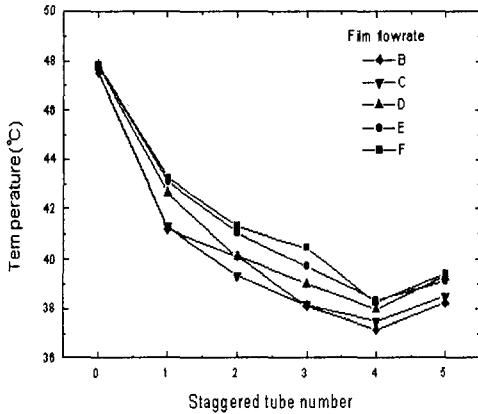


Fig. 3 Solution temperature variation on the staggered absorber tubes.

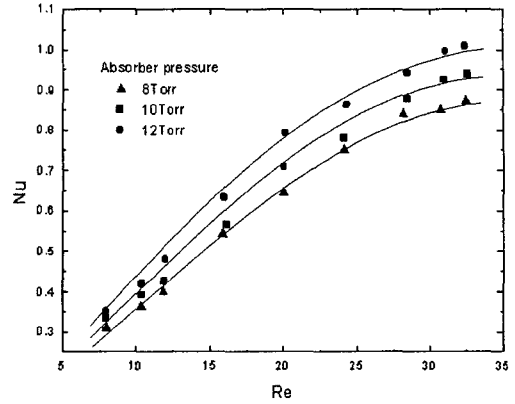


Fig. 4 Nusselt number for the various film Reynolds numbers at different absorber pressure.

이것은 흡수관 외부 액막내 냉매의 확산계수  $(7)$ 가  $1.4 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 로 매우 적어서 흡수용액량이 아주 크게 증가하면 액막두께가 저항으로 작용하게 되어 흡수된 냉매증기는 기/액 경계면에 잔존하게 되고, 액막을 혼합시키는 이차 유동이 생성되지 못하여 둔화되는 것으로 분석되며, 흡수용액 유량의 큰 증가가 유해 액막의 기/액 경계면에서의 액과 냉매의 접촉 시간을 감소시키기 때문이다.

Fig. 7은 냉매의 이론적인 흡수량과 실제 흡수량의 비를 나타내며 흡수유량이 증가할수록 이 값은 감소함을 보여준다. 이론흡수량은 흡수기 내부 압력에서 흡수기 입구와 출구지점의 용액 온도에 대한 평형 농도를 구하여 산정하였다. 흡수비를 보면 설계 유량에서는 압력에 따라 약 16~19% 정도이고, 액막유량이 설계값의 약 3배 이상으로 증가하면 약 10~12% 이하로 저하되고 있다. 냉매를 충분히 흡수시키기 위해서는 흡수액 유량을 크게 증가시키는 것이 바람직할 것이나 흡수효율이 감소하게 되고 용액펌프의 동력 등을 증가시키게 되므로 적정 유량을 유지하는 것이 바람직하게 된다. 그러므로 발생된 냉매를 흡수용액에 충분히 흡수시키면서 높은 효율을 유지하기 위해서는 순환유량을 설계치의 3배 정도로 설계하는 것이 적절한 것으로 판단된다.

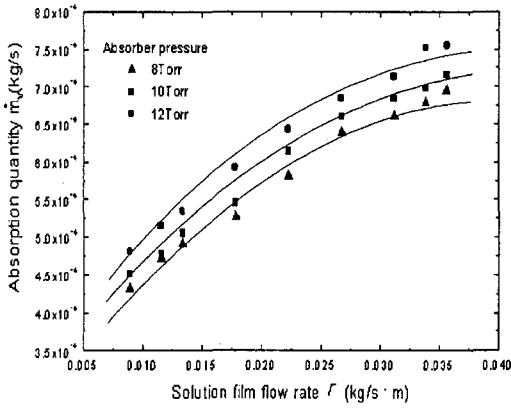


Fig. 5 Effect of various solution film flow rates on absorption quantity at different absorber pressure.

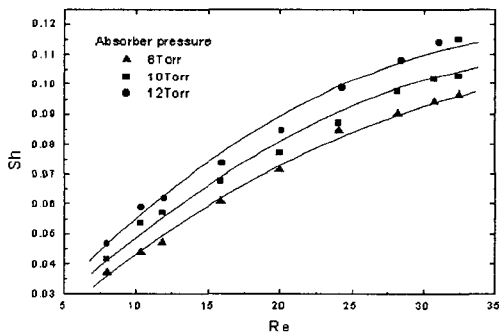


Fig. 6 Sherwood number for the various film Reynolds numbers at different absorber pressure.

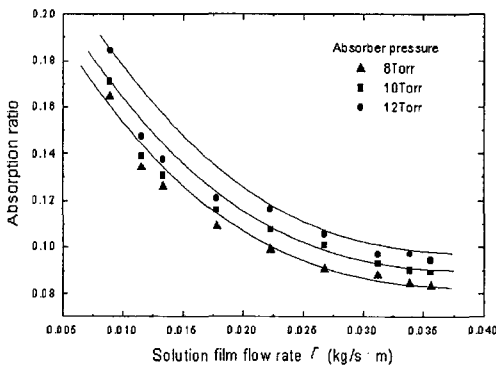


Fig. 7 Absorption ratio for the various solution film flowrates at different absorber pressure.

본 장방형 다관 수평흡수기내 LiBr흡수용액에 냉매가 흡수될 때 물질전달계수 관계는 실험으로부터 다음 관계식으로 표현되며 적용은  $5 < Re < 35$ 의 층류흐름 범위가 된다. 흡수기 압력의 무차원수가 포함되어 표시된 것은 액/기 물질전달 현상에서 관외 액체의 증기화나 증기의 액체에 흡수 경우 시스템 압력에 영향을 크게 받기 때문이다.<sup>(8)</sup>

$$Sh = 0.021Re^{0.59}Sc^{0.25}P_{s/a}^{0.66} \quad (10)$$

### 4.3 흡수기 압력에 따른 열 및 물질전달특성

Fig. 5에서 Fig. 7은 흡수기내의 압력이 8 Torr, 10 Torr, 12 Torr의 경우, 흡수기내의 물질전달 특성으로 흡수기내의 압력이 상승할수록 향상되는 경향을 보여준다. 각기 다른 압력에서 냉매증기가 용액내로 흡수되는 원리는 흡수용액 내에 존재하는 냉매의 증기압과 흡수용액 외부에 기체상태로 존재하는 냉매의 증기압과의 차에 의해서 이루어진다. Fig. 5의 결과는 일정한 흡수막유량에서 용액의 온도와 농도가 일정할 때 유하 흡수용액내 냉매의 분압은 일정하게 유지되나, 외부 냉매 발생량이 커서 흡수기 압력이 높게 되면 냉매 증기압과 흡수용액내의 압력차가 커져 흡수 구동력이 향상되기 때문이다. 그러나 실제 흡수식 열펌프의 경우 흡수기와 증발기가 하나의 셀안에 설치되어 같은 압력 조건으로 구동되므로 흡수기의 흡수특성을 좋게 하기 위하여 압력을 상승시키면 증발기내의 냉매 증발온도가 상승하게 되어 시스템 성능의 저하를 초래한다. 그러므로 발생된 냉매의 충분한 흡수를 위하여는 흡수액의 순환유량을 증가시키는 것이 바람직하다.

Fig. 4의 압력에 따른 열전달 특성을 보면 압력이 클수록 열전달계수의 값이 증가한다. 이는 압력 상승에 따라 용액의 냉매 흡수력 즉 물질전달이 증가하여 흡수용액내 흡수열의 발생이 증가되기 때문이다.

### 5. 결론

본 연구에서는 LiBr/H<sub>2</sub>O식 흡수식 열펌프에 적용되는 장방형 수평원관 흡수기의 외부를 따라

LiBr용액이 액막의 형태로 흘러내릴 때, 냉매 흡수를 위한 적정 흡수용액 흐름량의 도출 실험과 냉매 흡수과정의 전열 및 물질전달 특성에 대하여 실험적으로 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 흡수액막 유량이 증가함에 따라 냉매 흡수량이 증가하나, 설계치의 4배이상에서는 냉매 흡수량의 증가가 둔화된다.

(2) 발생된 냉매를 충분히 흡수하기 위한 적정 흡수액 순환유량은 설계값의 3배가 된다.

(3) 냉매의 이론적인 흡수량과 실제 흡수량의 흡수비는 흡수유량이 증가할 수록 감소한다.

(4) 흡수기 내부의 압력이 높을수록 냉매의 압력과 흡수용액내 냉매의 분압차가 커져 흡수량이 증가하며, 열전달 특성도 향상된다.

### 참 고 문 헌

- Hoffmann, L., 1996, Experimental investigation of heat transfer in a horizontal tube falling film absorber with aqueous solution of LiBr with and without surfactants, *Int. J. Refrig.*, Vol. 19, No. 5, pp. 331-341.
- Cosenza, F., Villet, G. C., 1992, Absorption in falling water/LiBr films on horizontal tubes, *Proc. Absorption Heat Pump Conference*, pp. 693-701.
- Kim, K. J., 1995, Absorption of water vapour into falling films of aqueous Lithium Bromide, *Int. J. Refrig.*, Vol. 18, No. 7, pp. 486-494.
- 김선창, 오명도, 이재현, 1997, 공냉형 흡수식 냉방 시스템에서 LiBr 수용 과열도가 증기흡수에 미치는 영향, *공기조화·냉동공학논문집* 제9권, 제2호, pp. 122-133.
- 문춘근, 최인수, 김태진, 박석호, 윤정인, 1997, 고성능 흡수전열관 개발을 위한 흡수기 특성실험, *공기조화 냉동공학회 동계학술대회 논문집*, pp. 126-131.
- 설신수, 고흥웅, 이상용, 1995, LiBr-H<sub>2</sub>O 흡수기 내부에서의 유동 및 열/물질전달 현상에 관한 실험적 연구(I), *공기조화 냉동공학회 동계학술대회 논문집*, pp. 330-334.
- Kashiwagi, T., 1984, Heat and mass diffusion in the absorption of water vapor by aqueous solution of Lithium Bromide, *Transaction of the Japanese Association of Refrigeration*, Vol. 1, pp. 89-98.
- Welty J. R., Wicks C. E., Wilson R. E., 1984, *Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer*, John Wiley & Sons, p. 656.